

Katedra strojírenské technologie  
Oddělení strojírenské metalurgie

Studijní rok: 2012/13

Studijní program B 2341 – Strojírenství

Materiály a technologie  
Zaměření strojírenská metalurgie

**Sledování mechanických a technologických vlastností  
formovacích směsí**

Monitoring the mechanical and technological properties of  
molding mixtures

Adéla Rulcová  
**KSP – SM – B48**

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Jiří Machuta, Ph.D.

**Rozsah práce a příloh:**

|                |    |
|----------------|----|
| Počet stran:   | 43 |
| Počet tabulek: | 2  |
| Počet obrázků: | 18 |
| Počet příloh:  | 2  |

Liberec, 24. 5. 2013



Stránka pro originální zadání bakalářské práce





## ANOTACE

Studijní program: B2341 - Strojírenství  
Student: Adéla Rulcová  
Téma práce: **Sledování mechanických a technologických vlastností formovacích směsí**  
Monitoring the mechanical and technological properties of molding mixtures  
  
Číslo BP: KSP - SM - B48  
Vedoucí BP: Ing. Jiří Machuta, Ph.D.

### Abstrakt:

Tato bakalářská práce se zabývá sledováním mechanických a technologických vlastností formovacích směsí. Práce se skládá ze dvou základních částí (teoretická a experimentální). Teoretická část popisuje základní charakteristiku slévárenských směsí. Dále se pak věnuje popisu mechanických a technologických zkoušek, kterými se ověřují dané vlastnosti formovacích směsí. V experimentální části jsou provedeny a zpracovány některé z popsanych zkoušek na vybraném vzorku bentonitové formovací směsi.

### Abstract:

This bachelor thesis is devoted to monitoring of mechanical and technological qualities of molding mixtures. The thesis consists of two basic parts: theoretical and experimental. The theoretical part describes the basic characteristics of foundry mixtures. It then deals with the description of mechanical and technological tests, to verify the properties of molding mixtures. In the experimental part, several of those tests are applied and processed on a chosen sample of bentonite molding mixture.



**Místopřísežné prohlášení:**

Místopřísežně prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracovala samostatně s použitím uvedené literatury.

V Liberci 24. května 2013

.....  
Adéla Rulcová  
Mšenská 13  
46604 Jablonec nad Nisou



## Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce **Ing. Jiřímu Machutovi, Ph.D.** za odborné vedení, věnovaný čas, cenné rady a připomínky při zpracování a měření bakalářské práce. Velmi také děkuji Ing. Jiřímu Pazderkovi a firmě KERAMOST a.s. za konzultaci výsledku a zprostředkování vzorku. Dále pak patří mé poděkování paní prof. Ing. Ivě Nové, CSc. a všem dalším, kteří větším nebo menším dílem přispěli k úspěšnému dokončení této bakalářské práce.



## Obsah

|  |    |
|--|----|
| OBSAH .....  | 6  |
| SEZNAM SYMBOLŮ A JEDNOTEK .....  | 7  |
| 1. ÚVOD .....  | 8  |
| 2. TEORETICKÁ ČÁST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE.....   | 9  |
| 2.1. SLÉVÁRENSKÉ FORMOVACÍ SMĚSI .....   | 9  |
| 2.2. VLASTNOSTI SLÉVÁRENSKÝCH FORMOVACÍCH SMĚSÍ A<br>JEJICH ZKOUŠENÍ.....                | 15 |
| 2.2.1. Zkoušky ke zjištění pevnosti formovacích směsí .....                              | 16 |
| 2.2.2. Zkoušky ke zjištění tvrdosti .....  | 21 |
| 2.2.3. Stanovení vlhkosti formovacích směsí .....  | 21 |
| 2.2.4. Zkouška ke zjištění prodyšnosti formovacích směsí.....                            | 23 |
| 2.2.5. Zkouška ke stanovení množství vyplavitelných látek.....                           | 24 |
| 2.2.6. Zkouška ke zjištění zrnitosti síťovým rozbořem (granulometrická<br>skladba) ..... | 26 |
| 3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE.....   | 30 |
| 3.1. STANOVENÍ PEVNOSTI FORMOVACÍCH SMĚSÍ.....   | 30 |
| 3.2. STANOVENÍ VLHKOSTI FORMOVACÍCH SMĚSÍ .....  | 33 |
| 3.3. STANOVENÍ PRODYŠNOSTI FORMOVACÍCH SMĚSÍ.....  | 34 |
| 3.4. STANOVENÍ MNOŽSTVÍ VYPLAVITELNÝCH LÁTEK<br>FORMOVACÍCH SMĚSÍ.....                   | 35 |
| 4. ZÁVĚR .....   | 38 |
| SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....   | 40 |
| SEZNAM OBRÁZKŮ .....   | 41 |
| SEZNAM TABULEK.....  | 42 |
| SEZNAM PŘÍLOH.....   | 43 |

## Seznam symbolů a jednotek

|                  |  |  |
|------------------|--|--|
| $\sigma_{tl}$    | pevnost v tlaku  | [kPa]                                  |
| $\sigma_{střih}$ | pevnost ve střihu  | [kPa]                                  |
| $\sigma_{tah}$   | pevnost v tahu   | [kPa]                                  |
| F                | maximální síla, při níž dojde k porušení válečku                       | [kN]                                   |
| S                | příčný průřez zkušebního válečku                                       | [m <sup>2</sup> ]                      |
| W <sub>P</sub>   | vlhkost poměrná (relativní)  | [%]                                    |
| m <sub>v</sub>   | hmotnost vlhkého vzorku  | [g]                                    |
| m <sub>s</sub>   | hmotnost vysušeného vzorku   | [g]                                    |
| $\rho_1$         | měrná hmotnost částice   | [kg.m <sup>-3</sup> ]                  |
| $\rho_2$         | měrná hmotnost prostředí   | [kg.m <sup>-3</sup> ]                  |
| $\eta$           | dynamická viskozita prostředí  | [kg.m <sup>-1</sup> .s <sup>-1</sup> ] |
| r                | poloměr částice  | [m]                                    |
| g                | gravitační zrychlení   | [m.s <sup>-2</sup> ]                   |
| m <sub>s</sub>   | hmotnost vysušeného písku před plavením                                | [g]                                    |
| m <sub>o</sub>   | hmotnost vysušeného ostřiva po plavení                                 | [g]                                    |
| m <sub>p</sub>   | hmotnost podílu ostřiva na sítu  | [g]                                    |
| m <sub>s</sub>   | hmotnost vysušeného ostřiva naváženého před plavením                   | [g]                                    |
| d <sub>50</sub>  | velikost středního zrna  | [mm]                                   |
| d <sub>25</sub>  | myšlená velikost ok síta, na kterém by se zachytilo 25% daného ostřiva | [mm]                                   |
| d <sub>75</sub>  | myšlená velikost ok síta, na kterém by se zachytilo 75% daného ostřiva | [mm]                                   |

## 1. ÚVOD [1], [7], [10]

Slévárenství je výrobní odvětví - netřísková technologie, velmi starého původu. První zmínky o tomto řemeslu můžeme datovat již do doby 2000 až 2500 let př.n.l. Jeho vznik byl podmíněn objevem kovů s nízkou teplotou tání, jako jsou měď, olovo, cín a bronz. Odtud je také odvozován název doby bronzové. V této době byly odlévány převážně nástroje, umělecké předměty či zvony.

Velmi důležitou součástí slévárenské výroby jsou formy, které prošly významným vývojem. Nejstarší používané formy byly kamenné, později se začaly používat formy pískové a kovové (kokily). Také se dochovalo svědectví z období 600 až 800 let př.n.l., že již tehdy byla použita metoda lití na vytavitelný model a to odlitek bronzového býčka (Moravský kras). Velký rozmach slévárenských forem a jader nastal také s rozvojem vojenské a letecké techniky, automobilového a textilního průmyslu. Vedle forem pískových se intenzivně začaly používat i formy kovové pro nízkotlaké, vysokotlaké, popř. gravitační lití.

Důležitým zlomem ve vývoji byla na přelomu 18. a 19. století průmyslová revoluce, která přinesla spousty technických novinek a tím i rozšíření výroby tvarově složitých součástí. Avšak největší průmyslový vývoj byl mezi 19. a 20. stoletím, kdy se začala rozvíjet hromadná výroba. Přibývají slévárny řízené poloautomaticky nebo automaticky.

V dnešní době je slévárenství jedním z nejdůležitějších odvětví, jak světového, tak i našeho průmyslu a doba jde stále dopředu. S tím rostou i nároky na jakost odlitku a proto je třeba modernizovat nejen technické a technologické zařízení slévárny, ale také zdokonalit kvalitu formovacích směsí, případně forem. U forem a jader z pískových formovacích směsí je nutná znalost vlastností základních surovin směsí (tj. ostřiva, pojiva, přísad a vody), a jejich vzájemného působení při přípravě a zpracování. Je tedy nutná jak kontrola celého procesu výroby formovacích směsí, která probíhá přímo v provozu, tak kontrola vlastností slévárenských forem a slévárenských formovacích směsí, která probíhá v laboratořích.

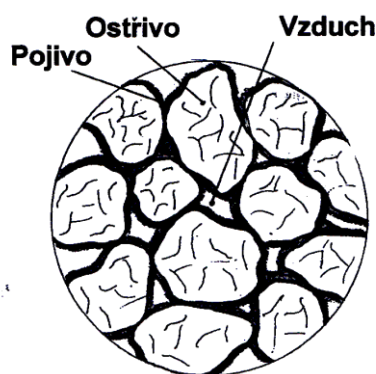
Také sledováním vlastností (mechanických i technologických) formovacích směsí se zabývá má bakalářská práce.



## 2. TEORETICKÁ ČÁST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

### 2.1. SLÉVÁRENSKÉ FORMOVACÍ SMĚSI [1], [2], [4], [7]

Pískové formovací směsi slouží k výrobě netrvalých (jednorázových) - pískových forem. Formovací směs je polydispersní třífázová soustava, jejíž vlastnosti závisí na vlastnostech a vzájemném působení všech tří fází - pevné, kapalně, plynné. Částice různé velikosti a tvaru, které tvoří a určují kostru celé soustavy, tvoří tuhou fázi nazývanou ostřivo. V mezerách mezi tuhými částicemi je uzavřená fáze kapalná (pojivo, voda..) a plynná (vzduch).



Obr. 2-1 Schéma formovací směsi

Ostřivo a pojivo jsou dvě základní složky formovacích směsí, nezbytné jsou také přísady, které zlepšují vlastnosti směsi. Dále může formovací směs obsahovat vodu, která u směsí 1. generace působí jako plastifikátor.

Formovací směsi lze dělit podle různých způsobů, například podle určení na:

- Modelovou směs, která se sype přímo na model a tím se vytváří líc formy. Tato směs musí být velmi kvalitní, jelikož je při odlévání a tunutí odlitku ve styku s taveninou.
- Výplňovou směs, která vyplňuje zbylý objem rámu, pokud byla použita modelová směs. Nemusí být tak kvalitní, nejčastěji se získává z již použitých jader.
- Jádrovou směs používanou pro výrobu jader. Tato směs je velmi kvalitní a jsou na ni kladeny ještě větší požadavky než na směs modelovou, neboť

jádrové směsi bývají velmi tepelně namáhány a musí odolávat penetraci (pronikání) taveniny mezi póry jádra. Též musí mít dobrou rozpadavost po odlití a delší skladovatelnost.

- d) Jednotnou směs, která je používána jak pro výrobu líce formy, tak pro vyplnění zbylého objemu. Je to v podstatě směs vratná (vzniklá rozbitím forem), avšak ošetřená po každém předchozím použití. Nejčastěji to jsou jednotné bentonitové směsi pro strojní formování.

Podle obsahu volné vody (tj. vody, kterou lze odstranit sušením na teplotu 100°C) je také možno dělit směsi do různých skupin.

- Nejnižší obsah vody mají *Bezvodé směsi* a to do 0,1%. Nejsou na bázi jílových pojiv, ale plastifikátorem jsou zde organické sloučeniny (např. alkohol).
- Obsah vody do 3% mají *směsi polosuché*. Jsou to směsi, které nepotřebují velké plastifikační vlastnosti, jelikož jsou určeny pro strojní formování, popř. lisování velkými měrnými tlaky.
- *Směsi na syrovo* obsahují do 5% vody, není nutné je sušit a zajišťují nejprogresivnější výrobu forem.
- O něco více vody, 6 až 7%, obsahují *směsi na přisušení*, které jsou určeny tam, kde se suší pouze líc forem. Po vysušení líce je nutno ihned odlévat, aby nedošlo k jeho opětovnému navlhnutí.
- S obsahem vody více než 7% jsou to *směsi na sušení*. Formy se suší v celém objemu, kdy se při teoretické teplotě 100°C odpařuje volná voda.

**Ostřivo** je zrnitý materiál který tvoří nosnou část formovací směsi, jeho obsah bývá různý podle charakteru směsi. U běžných formovacích směsí ho bývá cca 92%, ale může ho být až 98% (formy sádrové). Zrna jsou větší než 0,02 mm, mají různý tvar (kulatá i ostrohranná) a ovlivňují kvalitu povrchu odlitku. U ostřiva je důležitá odolnost proti vysokým teplotám (žáruvzdornost), chemická podstata, hranatost a velikost zrn. Tyto charakteristiky rozhodují o objemové hmotnosti, pórovitosti, prodyšnosti a propustnosti směsi, tepelné vodivosti, tepelné dilataci a také o pevnosti forem a jader.

Podle původu se ostřiva dělí na přirozená (křemenné písky, zirkon, olivín atd.) a umělá (korund, magnezit, šamotová drť atd.). Dále se ostřiva dělí podle chemické povahy na kyselé (křemenné písky), neutrální (šamot, korund) a zásaditá (magnezit).

Nejpoužívanějším ostřivem je křemenné ostřivo (jehož chemickou podstatou je  $\text{SiO}_2$ ), které je nejekonomičtější, v přírodě se velice často vyskytujícím minerálem. Má vhodnou zrnitost. Teplota tání křemene je nad  $1700^\circ\text{C}$  a proto je vhodný pro výrobu forem k odlévání většiny slévárenských slitin. Křemenné ostřivo je kyselé povahy a nelze ho používat pro výrobu forem určených k odlévání materiálů, které vytváří oxidy zásadité povahy, např. Haetfieldova ocel (manganová austenitická ocel).

**Pojivo** umožňuje soudržnost formovací směsi a tvoří ho částice menší než 0,02 mm. Obsah pojiva bývá 6 až 8%, v závislosti na druhu formovací směsi. Pojivo pojí částice ostřiva v kompaktní celek a vazba mezi nimi je určována velikostí adhezních sil mezi jejich povrchy, a velikostí sil kohezních, které jsou určeny vnitřní pevností daného typu pojiva. Charakter těchto sil je dán stavem povrchu, granulometrickou skladbou ostřiva a fyzikálněchemickými vlastnostmi různých druhů pojiv. Pro výrobu forem je důležité, aby adhezní síly byly vyšší než síly kohezní a naopak při vytloukání odlitku nebo regeneraci ostřiva jsou důležité malé adhezní síly. Spojením pojiva a ostřiva vzniká pevnost formovací směsi - vaznost za syrova, pevnost po vysušení a vytvrzení, pevnost za vysokých teplot i zbytková pevnost směsi (rozpadavost po odlití).

Pojiv je celá řada a dělí se podle různých kritérií, například rozlišujeme pojiva anorganická (jíly, vodní sklo, sádra atd.) a organická (pryskyřice, tuky, oleje, sacharidy). Novější způsob dělení pojiv je do generací:

**Pojiva směsí 1. generace** jsou pojiva anorganická na bázi jílu, která se formují mechanickým způsobem (pěchováním, střásáním, lisováním). Výsledkem pojení jsou kapilární tlaky a Van der Waalsovy síly. Tyto pojiva jsou nejčastěji součástí přírodních směsí. Pro slévárenské účely u nich hodnotíme bobtnavost a

žáruvzdornost. Používají se pro formování na syrovo i po vysušení, jsou nositelem vaznosti i pevnosti po vysušení. Pojící systém jílu je závislý na přítomnosti vody a je vratný, tím se tato pojiva liší od chemicky tvrzených pojiv.

*Kaolinitický jíl* tvoří spolu se šamotovým lupkem formovací směs vhodnou pro výrobu forem a jader k odlévání ocelových odlitků. Má vynikající žáruvzdornost, ale malou bobtnavost a tudíž k dosažení potřebné vaznosti formovací směsi vyžaduje značné množství vody. Dává směsi malou vaznost, proto není vhodný pro lití na syrovo.

*Illitický jíl* je hlavním pojivem přírodních písků a používá se pro odlévání těžkých litinových odlitků, neboť má dobrou bobtnavost i žáruvzdornost. Vzniká zvětráváním slídových nerostů. Nejdůležitějším minerálem této skupiny je glaukonit, díky němuž mají jíly zelenou barvu. Glaukonit nabývá plastičnosti a vaznosti až po rozmíchání s vodou. Illitický jíl dává směsím střední vaznost.

U *Montmorillonitických jílu* je základem montmorillonit ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O} \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ) a je-li jeho obsah vyšší než 75 – 80%, pak nazýváme tyto jíly Bentonity (název je podle naleziště Fort Benton v USA). Mají nižší žáruvzdornost, ale velkou bobtnavost, používají se k odlévání litinových odlitků. Bentonity patří k nejrozšířenějším jílovým pojivům, mají výbornou pojivovou schopnost a umožňují přípravu směsi s minimálním obsahem pojiva. Díky malému obsahu jílu ve formovací směsi a tedy zároveň nízkému obsahu vody, je možné odlévat formy na syrovo. Ve směsích má vynikající vaznost, je velmi plastický a vazný, může vázat více vody než kaolinitický nebo illitický jíl. Montmorillonitické jíly se vyskytují na poměrně málo místech, jejich hlavní naleziště je ve Francii. Tyto jíly jsou buď sodné (americký sodný jíl), které mají nejlepší slévárenské vlastnosti, nebo vápenato-hořečnaté (např. náš braňanský bentonit).

Z ekologického hlediska jsou jílová pojiva velmi příznivá a ve slévárnictví ještě velmi používána.

**Pojiva směsí 2. generace** jsou založena na chemické podstatě pojení, což je nevratný proces. Pojení probíhá buď zásahem zvenčí (za tepla i za studena) nebo zevnitř - samotvrdnoucí formovací směsi.

*Organická pojiva* se nejvíce využívají pro výrobu jader a řadí se mezi ně oleje, sachariny a dnes stále více používané umělé pryskyřice. Přírodní oleje mají dobrou tekutost, patří mezi samotvrdnoucí směsi a vytvrzují se oxidací, problémem je zde odvod plynů. Sacharidy zajišťují dobrou pevnost po vysušení, dělíme je na polysacharidy a monosacharidy. Pryskyřice jsou vhodné nejen pro výrobu jader, ale i pro výrobu forem, jsou velmi plynotvorné, avšak podporují dobrou rozpadavost směsi. Dnes se ve slévárenství uplatňuje celá řada pryskyřic: fenolické (pryskyřice novolakového a resolového typu), furanové, močovinové, alkydové, epoxidové, akrylátové, polyuretanové.

*Anorganická pojiva* jsou výhodnější z ekologického hlediska, mají nižší plynotvornost. Patří mezi ně vodní sklo (koloidní roztok silikátů-křemičitanů), sádra, cement a látky pro výrobu forem na vytavitelný model (alkosoly, hydrosoly).

**Pojiva směsí 3. generace** nejsou pojiva v pravém slova smyslu, jedná se spíše o pojivové systémy, kde využíváme fyzikálních účinků pojení. Výroba forem je realizována například pomocí magnetického pole, zmrazování nebo formování ve vakuu. Magnetický způsob pojení vyžaduje speciální typ ostřiva, jsou to jemné broky z magnetického materiálu. Ostatní metody využívají klasické např. křemenné ostřivo. Po odlití se formy rozpadají zrušením účinků silových polí. Tyto metody nejsou v běžné praxi tak rozšířeny.

**Pojiva směsí 4. generace** jsou na bázi živých organismů (např. bakterií). Biologická látka ve funkci pojiva se po zaformování rychle rozmnoží a spojí zrna ostřiva. Po ztuhnutí odlitku je organismy nutno usmrtit. Tyto systémy pojení jsou zatím ve stádiu výzkumu.

**Přísady** jsou látky, které zlepšují vlastnosti formovací směsi a tím i vlastnosti formy. Např.: zvyšují prodyšnost, zlepšují rozpadavost, zvyšují odolnost vůči povrchovým vadám odlitku (např. zapečeninám). Typickou přísadou je kamenouhelná moučka (letek), která po nalití taveniny začne hořet a její plyny oddělují líc formy od pronikající (penetrující) taveniny. Často se také přidávají

dřevěné piliny, ty po odlití vyhoří a ve formě vytvoří póry (kanálky), čímž se zvýší prodyšnost a současně se umožní dilatace formy.

**Voda** ve formovací směsi působí jako plastifikátor, tj. dává směsi vlastnosti nutné k udržení tvaru po formování, a to zejména u směsí jílových a s anorganickými pojivy (cemet, sádra). Bývá jí kolem 3-4 hmot. %.

Požadavky na vlastnosti formovacích směsí určuje technologie výroby formy a odlitku. Ideální formovací směs by měla být levná, dostatečně tekutá látka, která po styku s modelovým zařízením vytvoří formu požadované kvality.

Ve výrobním procesu prochází formovací směs dvěma fázemi. Při první fázi dochází ke zhotovení formy a jader, zde je tedy formovací směs materiálem ze kterého se vyrábí forma. Pro tuto fázi je u směsí vyžadována homogenní příprava, dokonalá formovatelnost (tekutost, plasticita, vstřelovatelnost aj.), malá osýchavost a drobivost, mechanická pevnost ve spěchovaném stavu, přesnost udržení tvaru po vytažení modelu, dlouhá životnost atd. Ve druhé fázi prochází směs vzájemným působením na tekutý kov a tuhnoucí odlitek, je tedy nástrojem pomocí něhož měníme tekutý kov v odlitek a dáváme mu tvar. Při součinnosti působení kovu v této fázi musí mít jádrová či formovací směs dostatečnou prodyšnost, malou plynotvornost, tepelnou a chemickou stálost, mechanickou pevnost v zahřátém stavu, poddajnost při tuhnutí odlitku aj.

Formovací směs má velký vliv na kvalitu odlitků. Při sledování výskytu vad bylo zjištěno, že až polovina zmetkových odlitků je zapříčiněna formovací směsí, nebo jejím špatným použitím. Formovací směs může ovlivnit zabíhavost slévárenských slitin, kvalitu povrchu odlitku i vlastnosti mechanické.

## 2.2. VLASTNOSTI SLÉVÁRENSKÝCH FORMOVACÍCH SMĚSÍ A JEJICH ZKOUŠENÍ [1], [7]

Formy i formovací a jádrové směsi musí mít potřebné technologické vlastnosti, aby byla zaručena výroba kvalitních odlitků. Tyto vlastnosti lze dělit podle různých kritérií:

- a) technologické vlastnosti formovacích a jádrových směsí
- b) technologické vlastnosti forem a jader

Podle jiného dělení lze technologické vlastnosti dělit na:

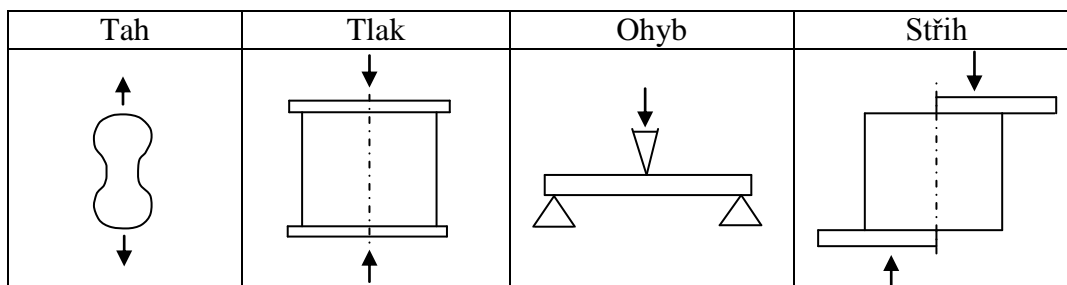
1. Vlastnosti směsí za syrova (v nesusušeném, nebo jinak ovlivněném formovacím a jádrovém materiálu). Ty ovlivňují postup výroby forem a patří mezi ně vaznost, prodyšnost, tvrdost, tekutost, vlhkost a drobivost.
2. Vlastnosti směsí po vysušení nebo chemickém zpevnění. To jsou již vlastnosti forem a patří mezi ně pevnost, otěruvzdornost a navlhavost.
3. Vlastnosti směsí během působení vysokých teplot taveniny, tyto vlastnosti nejvíce ovlivňují konečné vlastnosti odlitku. Jsou to též vlastnosti formy a patří sem pevnost, rozpadavost, plynatost, tepelná roztažnost, chemická odolnost a žáruvzdornost.

S rozvojem slévárenství jsou kvůli kvalitě odlitků kladeny zvýšené nároky na vlastnosti slévárenských formovacích směsí a tím rostou i nároky na přesnost a spolehlivost kontrolních metod ke zkoušení směsí, surovin, forem a jader. Předpokládají se dokonalejší a přesnější zkušební metody, komplexnější systém zkoušek. Při výzkumu nových typů surovin, pojivových systémů a dokonalejších směsí je nutno věnovat pozornost i zdokonalení měřicí techniky a přizpůsobit zkoušky a měření novým poznatkům.

Zkušební metody jsou normalizovány podle mezinárodních zvyklostí a umožňují srovnávat různé druhy směsí.

### 2.2.1. Zkoušky ke zjištění pevnosti formovacích směsí [3], [5], [11]

Pevnost formovacích směsí je mezní hodnota jejich odolnosti vůči vnějšímu zatížení, při němž dochází k trvalé deformaci nebo zničení vzorku. Stanovuje se pět základních pevnostních hodnot a to: pevnost v tlaku, štěpu, stříhu (smyku), tahu a ohybu.



Obr. 2-2 Schematické znázornění principu zkoušek pevnostních vlastností formovacích směsí [5]

Na pevnost mají vliv faktory jako je složení zrna, obsah pojiva, stupeň spěchování, vlhkost, proces přípravy (pořadí dávkování, čas míchání) a teplota. Hodnota pevnosti je také do značné míry závislá na umístění, velikosti a přesnosti kontaktní plochy pojiva a zrn ostřiva. Minimální vliv na pevnost má zrnitost, větší vliv má tvar zrn ostřiva. Pojivo svou kvalitou a množstvím také ovlivňuje pevnost, stejně jako obsah vody ve směsi. S rostoucím obsahem vody pevnost nejprve roste až na maximum a po jeho dosažení opět klesá.

Zkoušky pevnosti jsou normované normou ČSN 72 1077 a provádí se na přístrojích různého typu a provedení. Existuje několik standardních druhů přístrojů, které vyrábějí různí výrobci.





a)



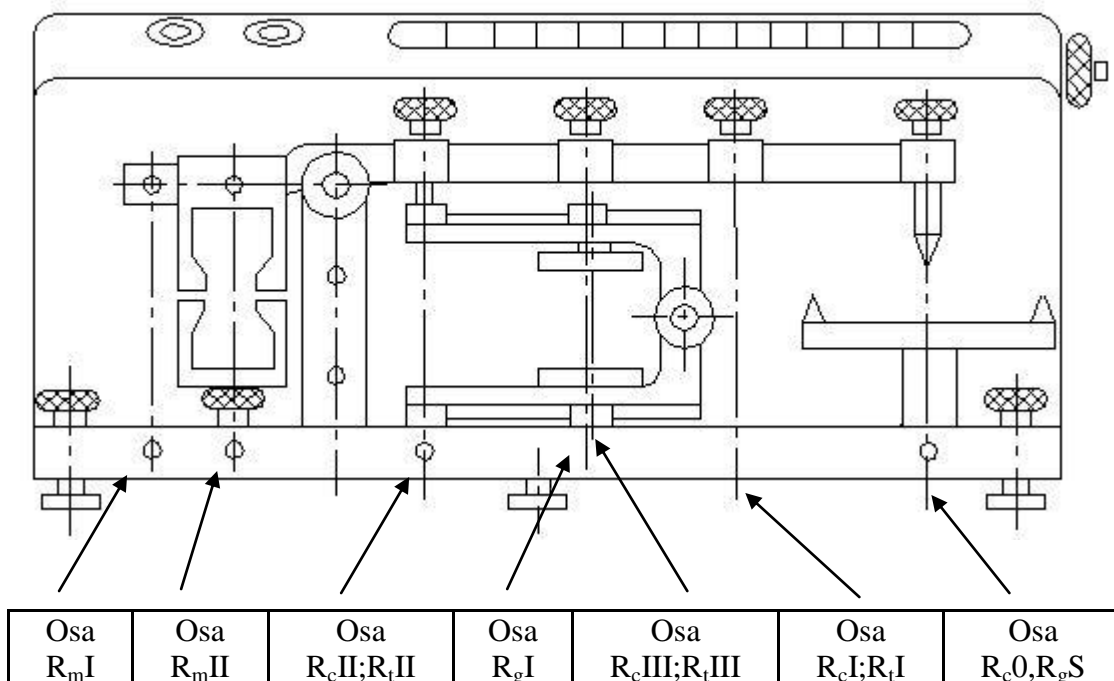
b)

a) přístroj k měření pevnosti ( Univerzální přístroj LRu, Polsko)

b) přístroj pro přípravu zkušebních vzorků a pro zkoušku pevnosti v tahu ( Přístroj LRP, Polsko)

Obr. 2-3 Přístroj k měření pevnosti [12]

**Univerzální přístroj LRu** - polské výroby na obrázku 2-3a) a obrázku 2-4, pracuje na principu jednoramenné páky. Tento princip umožňuje použití lineárních stupnic na měřicím válci . Přístroj je vybaven výměnnými čelistmi pro zkoušení všech základních zkoušek pevnosti formovacích směsí. Ke zvolení vhodné polohy čelistí a stupnice na měřicím válci slouží tabulka 2.1, kde jsou uvedeny rozsahy jednotlivých stupnic. Vybere se typ síly, potřebný rozsah, a podle označení rozsahu se zvolí osa (má stejné označení jako rozsah), do které se připevní dané čelisti.



Obr. 2-4 Univerzální přístroj LRU s označením os [5]

Tab. 2. 1 Rozsahy stupnic u univerzálního přístroje LRU [5]

| Typ síly    | Označení rozsahu | Rozsah (Mpa) |
|-------------|------------------|--------------|
| Tah         | $R_{mI}$         | 0-1,3        |
|             | $R_{mII}$        | 0-2,6        |
| Tlak        | $R_{c0}$         | 0-0,086      |
|             | $R_{cI}$         | 0-0,134      |
|             | $R_{cII}$        | 0-0,67       |
|             | $R_{cIII}$       | 0-2,1        |
| Ohyb        | $R_{gI}$         | 0-8,6        |
|             | $R_{gS}$         | 0-33,6       |
| Střih(smyk) | $R_{tI}$         | 0-0,105      |
|             | $R_{tII}$        | 0-0,525      |
|             | $R_{tIII}$       | 0-1,56       |

## Pevnost v tlaku

Při stanovení pevnosti v tlaku se rozlišuje stanovení pevnosti v tlaku za syrova a stanovení pevnosti v tlaku po vysušení. Zkušebním tělískem je váleček normalizovaných rozměrů, jehož průměr i výška je 50 mm. Aby měl zkušební váleček požadované rozměry s přípustnou tolerancí  $\pm 0,3$  mm, je třeba směs navažovat. Navážené množství směsi se opatrně přesype do jaderníku a spěchovává se třemi údery beranu přístroje pro pěchování zkušebních vzorků.

Pevnost v tlaku za syrova, nazývaná také vaznost, je definována jako zatížení [kN], při kterém dojde k porušení zkušebního vzorku, vztaženo na jednotku plochy tohoto vzorku. Obvykle se zjišťuje na zkušebním válečku vytlačeném z pouzdra po stanovení prodyšnosti. Zkušební váleček se vloží mezi paralelní kruhové plochy tlakových čelistí přístroje. Jedna z čelistí se uvede do pohybu tak, aby se tlak na zkušební váleček zvyšoval plynule, rovnoměrně a bez nárazů. V okamžiku porušení válečku přestává tlaková síla působit a na stupnici přístroje, jež přísluší danému zatížení (rozsahu), se odečte naměřený tlak. Pevnost v tlaku se udává v kPa, u starších přístrojů je však možné na stupnici odečítat pouze silovou veličinu.

V těchto případech se pevnost v tlaku vypočte podle vzorce:

$$\sigma_{tl} = \frac{F}{S} \text{ [kPa]}, \quad (2.1)$$

kde značí:  $\sigma_{tl}$  - pevnost v tlaku [kPa];

$F$  - maximální sílu, při níž dojde k porušení válečku [kN];

$S$  - příčný průřez zkušebního válečku [m<sup>2</sup>].

Pevnost v tlaku po vysušení se stanovuje na normalizovaných zkušebních válečkách vysušených při teplotě 200°C až 210°C po dobu 1 hod. Po vychladnutí válečku se provede vlastní zkouška, jejíž průběh je stejný jako při zjišťování pevnosti v tlaku za syrova. Vysušením se pevnost v tlaku zvyšuje.

Výsledkem zkoušky pevnosti v tlaku je aritmetický průměr nejméně tří měření. Liší-li se dvě ze zjištěných hodnot o více než 5% od vypočteného průměru, je nutno zhotovit 3 nové zkušební válečky a zkoušku opakovat.

Největší pevnosti v tlaku se dosahuje buď u velmi jemného nebo u velmi hrubého ostříva. Jemné ostřívo má velký počet dotykových ploch mezi zrny a to zvyšuje pevnost v tlaku, povlak na povrchu ostříva je však slabý. Hrubé ostřívo má mnohem méně dotykových ploch, avšak při stejném obsahu pojiva jsou zrna obalena silnější vrstvou, to způsobuje kompaktnější systém a to opět zvyšuje pevnost v tlaku. Pevnost směsi závisí také na době míchání ostříva s pojivem, čím delší doba míchání, tím lepší povlečení zrn pojivem a tím vzrůstá i pevnost. Pevnost roste také se stupněm spěchování.

### **Pevnost ve štěpu**

Postup měření pevnosti ve štěpu je stejný, jako při stanovení pevnosti v tlaku (vaznosti), používají se i stejné tlakové čelisti. Jediným rozdílem je umístění válečku, ten se upevní mezi čelisti, tak aby tlaková síla působila kolmo na osu válečku. Hodnoty při této zkoušce se odečítají na stupnici pro pevnost ve stříhu a vyjadřují se v kPa.

### **Pevnost ve stříhu**

Stanovení pevnosti ve stříhu se určuje podobně jako pevnost v tlaku. Provádí se na stejném stroji, avšak tlakové čelisti se musí vyměnit za čelisti pro stříh. Pro stříh se používají čelisti půlkruhové, které působí jen na protilehlé poloviny ploch základu zkušební válečku, je také možné použít speciální čelisti pro dvojité stříh.

Pevnost ve stříhu se provádí jak za syrova, tak i po vysušení, a vyjadřuje v kPa. Hodnoty se musí odečítat na stupnici pro stříhové namáhání.

### **Pevnost v tahu a ohybu**

Obě tyto hodnoty se definují stejným způsobem jako pevnost v tlaku a stříhu, tj. zatížení [kN], při kterém nastává porušení zkušební vzorku, vztaženo na kritický průřez a jsou rovněž udávány v kPa.

Při zkoušce na tah mají zkušební tělíska tvar osmičky určených rozměrů. Zhotovují se ve speciálních jadernicích stejným postupem jako válečky pro zkoušky na pevnost v tlaku.

Při zkoušce na ohyb má zkušební tělísko tvar hranolu o délce cca 170 mm. Účinná délka hranolu je 150 mm.

### 2.2.2. Zkoušky ke zjištění tvrdosti [2], [11]

Tvrlost je schopnost spěchované směsi odolávat vnikání cizího tělíska. Se zvyšujícími se hodnotami pevnosti formovacích směsí se zvyšuje i tvrdost, snižuje se s nadměrnou vlhkostí a s vyšší jemností zrn.

Měření tvrdosti se provádí buď přímo na vyrobených formách, nebo ve zkušebních laboratořích na zkušebních válečcích.

#### Povrchová tvrdost

Zkouška povrchové tvrdosti je obdobná měření tvrdosti kovů podle Brinella. Indikátorem je ocelová kulička, která se vtlačuje do povrchu formy konstantním tlakem, přičemž hloubka vtisku udává na stupnici použitého přístroje tvrdost formy.

Tvrlost má vliv na kvalitu povrchu odlitku. Forma, která je řídce upěchována, tedy měkká forma, je náchylná k zalití pórů kovem, odlitky mají horší povrch a špatně se čistí. Tvrlost formy má být taková, aby pohyb jejich stěn vlivem tlaku tekutého kovu byl minimální.

#### Tvrlost hloubková

Při zjišťování hloubkové tvrdosti se sondou měří odpor spěchované směsi proti vnikání ocelového hrotu při určitém počtu rázů. Odpor reaguje na změny spěchovatelnosti, vaznosti i prodyšnosti. Čím silněji je směs spěchovaná, tím má nižší prodyšnost, vyšší vaznost a klade větší odpor proti vnikání hrotu zkušebního přístroje. Počet rázů odpovídá hodnotě odporu směsi a v provozu pak udává vaznost, spěchovatelnost atd.

### 2.2.3. Stanovení vlhkosti formovacích směsí [1], [11]

Vlhkost ukazuje obsah volné vody ve směsi. Podstatou stanovení je vysušení vzorku do ustálené hmotnosti a měří se jako % úbytku hmotnosti formovací směsi po vysušení. Vlhkost formovacích směsí má vliv na jejich prodyšnost, tekutost a pevnostní hodnoty.

Vlhkost lze zjišťovat celou řadou zkušebních metod:

*Přímá metoda*, kdy se přímo určuje hmotnost vody, která se zachytí v sušicím prostředku (chlorid vápenatý), tato metoda je zdoluhavá a proto méně často používaná.

*Nepřímá metoda*, buď extrakční, kdy se voda převádí do roztoků, jejichž koncentraci a následné zředění kontrolujeme hustoměrem, nebo chemickou reakcí, kdy vzniká plyn, jehož množství je úměrné obsahu vody.

*Diferenční metoda*, kde se zajišťuje úbytek hmotnosti mezi vlhkou a suchou formovací směsí.

Jedna z nejpoužívanějších je metoda s intenzivním sušením, patřící mezi diferenční metody. Při této metodě všechny druhy zařízení a přístrojů pracují při teplotách vyšších jak 100°C. Nejvíce přístupné a zároveň nejpoužívanější je stanovení vlhkosti pomocí infralampy, které je velmi rychlé. Doba sušení je pro každou lampu jiná, a je stanovena tak, že při prodloužení sušení, nebo při dalším sušení již nedochází k dalšímu poklesu hmotnosti, tedy dosáhne se ustálené hmotnosti. Pro menší navážku vzorku (10-20 g) se obvykle suší 5-15 minut.

Dříve se používali externí váhy s přesností 0,05 g. V dnešní době je již součástí přístroje na měření vlhkosti váha s přesností na setiny gramu, kde se automaticky zobrazí naměřený údaj přímo na displeji, a to dle nastavení buď v jednotkách hmotnosti (pak je nutno vlhkost vypočítat dle vzorce), nebo přímo v procentech vlhkosti.

Výpočet vlhkosti v % se provede dle vzorce:

$$W_p = \frac{m_v - m_s}{m_v} \cdot 100 [\%], \quad (2.2)$$

kde značí:  $W_p$  – poměrnou (relativní) vlhkost [%];

$m_v$  – hmotnost vlhkého vzorku [g];

$m_s$  – hmotnost vysušeného vzorku [g].

Výslednou hodnotou vlhkosti je aritmetický průměr nejméně ze dvou stanovení. Neliší-li se zjištěné hodnoty od aritmetického průměru o více než 10 %, může výsledek považovat za platný. Zkouška je normována normou ČSN 72 1080.

#### 2.2.4. Zkouška ke zjištění prodyšnosti formovacích směsí [2], [7], [11]

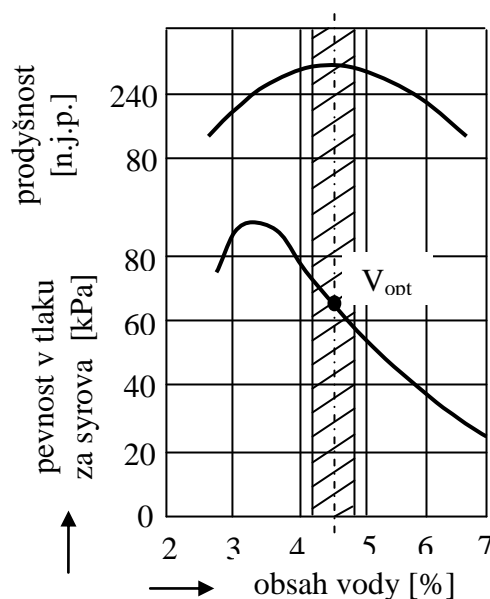
Prodyšnost je schopnost spěchované směsi propouštět plyny a páry. Vyjadřuje se v jednotkách prodyšnosti SI (j. p. SI), tj. počtem kubických centimetrů vzduchu, který se protlačí částí zkušební tělesa průřezu  $1 \text{ cm}^2$  a délky  $1 \text{ cm}$  při protlaku vzduchu  $100 \text{ Pa}$  za  $1$  minutu.

Zjišťuje se na zkušebních válečkách standardních rozměrů (průměr  $50 \text{ mm}$  a výšce  $50 \pm 0,3 \text{ mm}$ ), které se upěchují pomocí pýchovacího přístroje ze zkoušené směsi. Pěchování válečků se provádí do kovových pouzder, pomocí tří úderů beranidla. Spěchovaný zkušební váleček je ponechán v ocelovém pouzdře, a to se při použití přístroje LP na stanovení prodyšnosti umístí na hlavici přístroje, utěsní se a zapne se přístroj. Vzorkem prochází pod určitým tlakem vzduch a jeho množství, které projde válečkem za určitou dobu udává prodyšnost formovací směsi. Po ustálení manometru se hodnota prodyšnosti odečte přímo na přístroji. Přístroj obsahuje dvě trysky. Větší tryska o průměru  $1,5 \text{ mm}$  pro málo prodyšné směsi, menší tryska o průměru  $0,5 \text{ mm}$  pro prodyšnější směsi.

Prodyšnost závisí na obsahu pojiva, druhu písku, zrnitosti a vlhkosti. Přidáním většího množství pojiva prodyšnost klesá. Dále klesá s větší upěchovaností směsi, neboť pěchováním dochází k ucpávání pórů, proto se používají raději ostřiva hrubozrnnější a méně se pěchuje. Na prodyšnost má vliv i stejnoměrná velikost zrn ostřiva. Při různé velikosti zrn ostřiva malá zrna vyplňují mezery mezi většími zrny, ucpávají tak mezery a snižují prodyšnost. Také ostrohranná ostřiva mají při stejné velikosti menší prodyšnost než zrna kulatá. Malá prodyšnost směsi vede k vadám odlitku - bublinám, odvařeninám. Prodyšnost roste s vyšším obsahem vody (volné nebo vázané).

Zkouška prodyšnosti je důležitá pro určení optimální vlhkosti  $V_{\text{opt}}$  jílových směsí. Optimální vlhkost je různá pro formování na syrovo, nebo po vysušení. Při této vlhkosti je směs nejlépe formovatelná. Formovací směsi s maximální vazností jsou suché a drobnivé, kdežto směsi s optimálním obsahem vody, u nichž je dosaženo maximální prodyšnosti, jsou nejlépe formovatelné. Na obr. 2-5 je uvedeno stanovení

optimální vlhkosti bentonitové směsi na základě její prodyšnosti, v souvislosti s pevností v tlaku za syrova (vaznost) a obsahu vody.



Obr. 2-5 Stanovení optimální vlhkosti bentonitové směsi z její prodyšnosti [7]

Z uvedené závislosti je patrné, že nejvyšší hodnota prodyšnosti odpovídá obsahu vody 4,5% a této vlhkosti, kterou nazýváme  $V_{opt}$  odpovídá hodnota vaznosti cca 65 kPa. Rozdíl vlhkosti mezi optimální vazností a vazností maximální není vždy stejný a závisí na druhu a množství jílového pojiva. U bentonitových směsí tento rozdíl činí 0,8 až 1%. Jak je z uvedeného patrné, tak prodyšnost jílových směsí je důležitější než vaznost.

### 2.2.5. Zkouška ke stanovení množství vyplavitelných látek [1], [2], [3], [5]

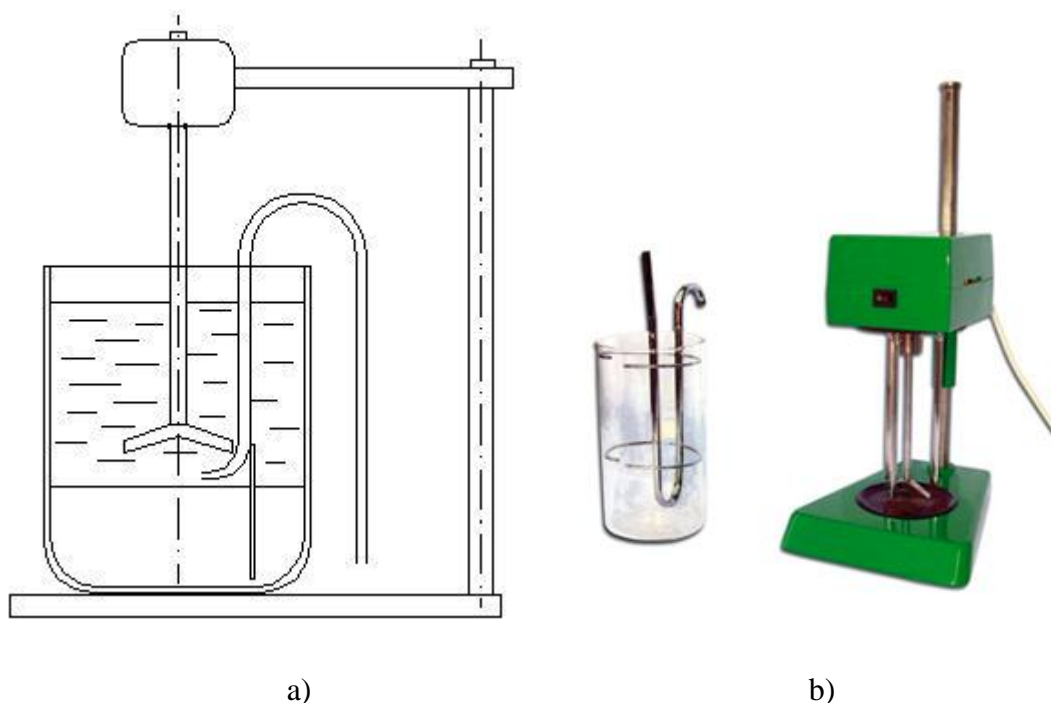
Obsah vyplavitelných látek, které jsou tvořeny podíly menšími než 0,02 mm, se určí normovaným způsobem (ČSN 72 1078) plavením a sedimentací. Postup stanovení vyplavitených látek je založen na rychlosti sedimentace. Podle Stokesova zákona je rychlost usazování kulových částic v libovolném prostředí vyjádřena vztahem:

$$v = \frac{2 \cdot r^2 (\rho_1 - \rho_2)}{9 \cdot \eta} \cdot 10^{-2} \cdot g \text{ [m.s}^{-1}\text{]}, \quad (2.3)$$



kde značí:  $\rho_1$  - hustotu částice [ $\text{kg.m}^{-3}$ ];  
 $\rho_2$  - hustotu prostředí [ $\text{kg.m}^{-3}$ ];  
 $\eta$  - dynamickou viskozitu prostředí [ $\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$ ];  
 $r$  - poloměr částice [m];  
 $g$  - gravitační zrychlení [ $\text{m.s}^{-2}$ ].

Vyplavitelné látky jsou důležitým kritériem pro hodnocení písků i směsí. Udávají se v % navážky. Zkouška je vhodná zejména pro bentonitové směsi.



a) schéma přístroje k měření množství vyplavitelných látek [5]  
 b) přístroj k měření množství vyplavitelných látek (LSz-2 Multiserw)[12]

Obr. 2-6 Přístroj k měření množství vyplavitelných látek

Z formovací směsi, vysušené při teplotě  $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ , a ochlazené na teplotu místnosti, se naváží vzorek o hmotnosti  $50 \text{ g} \pm 0,05 \text{ g}$ . Tento vzorek se nasype do kádinky, přidá se voda a 1% roztok hydroxidu sodného. Vzniklá suspenze se vaří a míchá pomocí speciálního vrtulkového míchadla. Vyplavitelné látky, které lpí na zrnech ostřiva, se rozpojí za varu vody s přísadou hydroxidu sodného a uvolní se

vířením vzniklé suspenze. Pak následuje odstátí (usazování), a odsátí vodního roztoku, včetně jemných podílů násoskou. Po odsátí je nutno doplnit kádinku vodou a to do výšky dle tabulky 2. 2. (měřeno od spodního okraje sacího otvoru násosky). Tento postup – rozplavení – usazování – odsátí – doplnění se provádí tak dlouho, až voda nad ostřivem zůstává čirá.

Tab. 2. 2 Výška hladiny vody v závislosti na její teplotě [3]

| Teplota vody [°C]   | 14   | 16   | 18    | 20    | 22    | 24    |
|---|------|------|-------|-------|-------|-------|
| Výška hladiny v mm při konstantní usazovací době 5 (10) minut | 92,0 | 97,0 | 102,2 | 107,3 | 112,4 | 118,5 |

Po plavení se ostřívo usazené v kádince opatrně přefiltruje, vysuší při teplotě  $110\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ . Vysušený vzorek se zváží na váhách s přesností  $\pm 0,01\text{ g}$  a uschová k dalším zkouškám.

Množství vyplavitelných látek se vypočítá ze vzorce:

$$V_{\text{vyplavitelné látky}} = \frac{m_s - m_o}{m_s} \cdot 100 \quad [\%], \quad (2.4)$$

kde značí:  $m_s$  - hmotnost vysušeného písku před plavením [g];

$m_o$  - hmotnost vysušeného ostřiva po plavení [g].

Výsledkem je aritmetický průměr dvou souběžných stanovení. Liší-li se výsledky o více než 20%, u směsi s vaznými jíly o 15%, je nutno zkoušku opakovat. Možné ztráty mohou nastat například při oplachování míchadla, nedodržení výšky hladiny podle teploty vody nebo opotřebením vrtulky míchadla. Vrtulky se váží a je-li jejich hmotnost snížena o více než 10% oproti původní hmotnosti, musí se vyměnit.

### 2.2.6. Zkouška ke zjištění zrnitosti síťovým rozbořem (granulometrická skladba) [1], [2], [3], [5], [7]

Zkouška síťovým rozbořem je normována dle ČSN 01 5030 a ČSN 72 1201. Stanovuje zrnitost, neboli granulometrickou skladbu ostřiva, a je graficky popisována tzv. součtovou křivkou. Granulometrická skladba ostřiva a její změny mají často velký vliv na vlastnosti formovacích směsí.

Sítový rozbor následuje až po stanovení množství vyplavitelných látek a je možné ho provádět při splnění těchto podmínek: všechny částice ostřiva musí být dokonale odděleny, nesmí se mechanicky rozrušovat a nesmí navlhčovat, aby nedocházelo k ucpávání sít. Ostřivo je na speciálním zařízení proséváno sadou sít. Odstupňování sít je stanoveno podle matematické závislosti, k rozboru formovacích směsí se nejčastěji používá kontrolní soustava sít dle ČSN 1210 s průměry ok 1,5; 1,0; 0,6; 0,3; 0,2; 0,1; 0,06 mm. Na síto s největším okem se nasype navážka ostřiva a nechá se prosévat tak dlouho, až je další propad zanedbatelný (cca 10 minut). Po prosetí se sledují podíly ostřiva zachycené na jednotlivých sítích. Poměrné obsahy jednotlivých podílů ostřiva se vypočítají ze vzorce:

$$\text{Podíl ostřiva na sítu} = \frac{m_p}{m_s} \cdot 100 [\%], \quad (2.5)$$

kde značí:  $m_p$  - hmotnost podílu ostřiva na sítu [g];

$m_s$  - hmotnost vysušeného ostřiva naváženého před plavením [g].

Výsledkem zrnitostního rozboru je aritmetický průměr dvou souběžných stanovení, pokud je rozdíl mezi nimi 20% , nebo větší, je nutno zkoušku opakovat.



a)



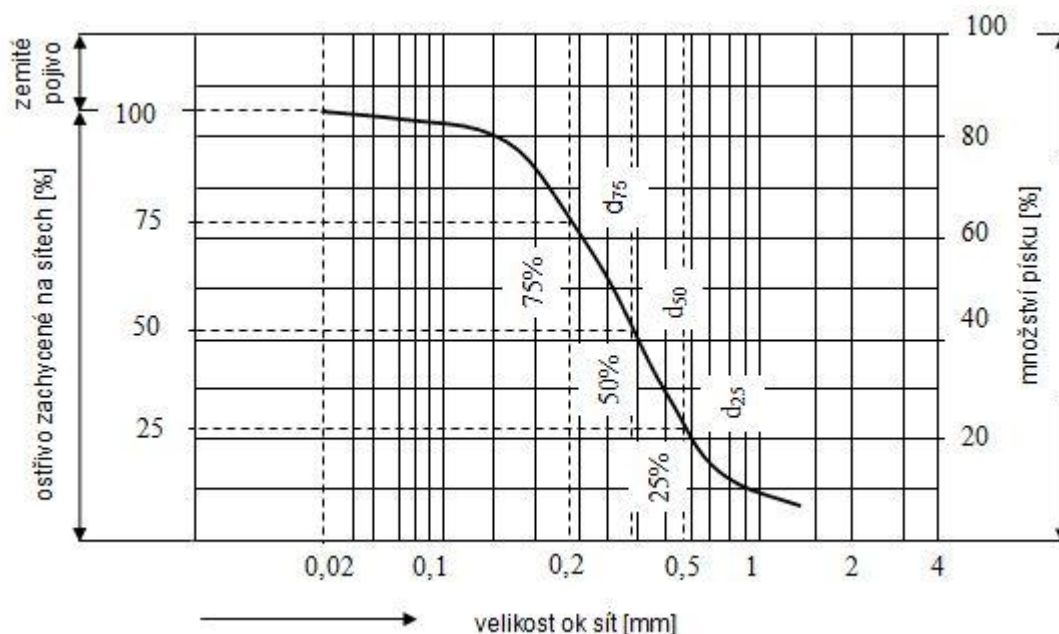
b)

a) *prosévací stroj Zbrojovka Brno [1]*

b) *prosévací stroj LPzE-2e Multi-serw Morek (polská výroba)[12]*

Obr. 2-7 Prosévací stroj se síty

Zrnitost písku se vyjadřuje buď tabulkou, v níž se uvedou množství jednotlivých frakcí, včetně vyplavitelných látek v %, nebo graficky diagramem zrnitosti ostřiva (součtovou křivkou) v semilogaritmickém rastru. Součtová křivka je vidět na obrázku 2-8. Na svislou osu se nanáší procenta ostřiva zachyceného na jednotlivých sítích, vztažená k původní navážce. Na vodorovnou osu, která má logaritmickou stupnici, se vynáší průměr ok sít [mm], na kterých se zachytila příslušná množství ostřiva.



Obr. 2-8 Konstrukce součtové křivky zrnitosti ostřiva [1]

Průsečík součtové křivky s přímkou, označující kritickou velikost částic ostřiva 0,02 mm, je bod vyznačující 100% ostřiva. Na úsečce, která vyjadřuje 100% ostřiva se vyznačí 25%, 50% a 75% , k těmto hodnotám se podle součtové křivky přidají odpovídající velikosti zrna, jež označujeme  $d_{25}$ ,  $d_{50}$ ,  $d_{75}$ .

- $d_{50}$  je velikost středního zrna a je to myšlená velikost ok síta, na kterém by se zachytilo 50% daného ostřiva
- $d_{25}$  je myšlená velikost ok síta, na kterém by se zachytilo 25% daného ostřiva
- $d_{75}$  je myšlená velikost ok síta na kterém by se zachytilo 75% daného ostřiva

Ze součtové křivky se hodnotí již zmíněná velikost středního zrna ( $d_{50}$ ). Dále pak stupeň stejnorodosti ( $s = d_{75} / d_{25}$ ), neboli pravidelnost zrnitosti. Čím je hodnota  $s = d_{75} / d_{25}$  bližší 1, tím jsou zrna ostřiva stejnoměrnější a součtová křivka je strmější. S klesající hodnotou je součtová křivka plošší a zrna ostřiva jsou velikostně různorodá.

Charakter a tvar zrn ostřiva má velký vliv na technologické vlastnosti formovacích směsí. Ostřiva kulatá jsou lépe spěchovatelná a tím má formovací směs větší tekutost, ale zároveň větší náchylnost na vznik vad odlitku - zálupů. Proto je pro syntetické bentonitové směsi vhodnější ostřivo poloostrohranné, se sníženou možností spěchování. U jádrových směsí je tomu naopak. Kulatá zrna ostřiva s hladkým povrchem se lépe povlékají vrstvou pojiva, ve spěchované směsi vytvářejí více kontaktních míst, a směs dosahuje vyšší pevnosti po vysušení, než formovací směs s ostrohranným ostřivem.

### 3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Účelem experimentální části práce bylo stanovení pevnosti (v tlaku, tahu a stříhu), vlhkosti, prodyšnosti a množství vyplavitelných látek formovacích směsí. K tomuto účelu byla použita jednotná bentonitová směs, která obsahovala ostřívo Střeleč, a pojivem byl směsný bentonit (KERIBENT C30 a SABENIL K), tato směs je používána ve firmě MOTOR JIKOV slévárna litiny, a.s. České Budějovice.

Zkoušky, prováděné v rámci řešení této experimentální části práce, byly prováděny na měřicích zařízeních v laboratoři Katedry strojírenské technologie - FS, TU v Liberci. Každá zkouška se prováděla na daném vzorku bentonitové směsi několikrát a výslednou hodnotou je hodnota průměru.

#### 3.1.Stanovení pevnosti formovacích směsí

Ke stanovení pevnosti formovacích směsí se použil univerzální přístroj LRU polské výroby (obr. 3-1). Na tomto přístroji se dají měřit všechny zkoušky pevnosti.



Obr. 3-1 Univerzální přístroj k měření pevnosti LRU (polská výroba)

#### Pevnost v tlaku a ve stříhu

Před samotným měřením se musely vytvořit zkušební vzorky o průměru i výšce  $50 \pm 0,3$  mm (obr. 3-2). Navázilo se předpokládané množství směsi, které se zhomogenizovalo ve speciálním mlýnku. Poté se směs přesypala do jaderníku, kde se třemi údery beranu pýchovacího přístroje spěchovala. Zkušební váleček se vytlačil z pouzdra a změřila se jeho výška. Pokud byla výška menší než 49,7 mm, navázilo se o pár gramů směsi více, a pokud byla výška větší jak 50,3 mm, navázilo se o pár gramů

směsi méně a znovu se vytvořil zkušební váleček. Takto se postupovalo tak dlouho, až se dosáhlo předepsaného rozměru válečku.



Obr. 3-2 Zkušební válečky

Obr. 3-3 Přístroj pro pěchování zkušebních těles

Po zhotovení zkušebních válečků se na přístroji nastavila vhodná stupnice. Nejprve se měřila **pevnost v tlaku**, pro tu se podle tabulky nastavila příslušná stupnice, stupnice  $R_{cIII}$ . Váleček se vložil mezi rovnoběžné kruhové desky (čelisti) tlakového přístroje, umístěné v ose, se stejným označením jako má stupnice ( $R_{cIII}$ ). Pohyblivá tlaková čelist se uvedla do pohybu příslušným tlačítkem přístroje tak, aby se tlak na váleček zvyšoval plynule. V okamžiku, kdy se váleček porušil, přestala působit tlaková síla a na stupnici přístroje byla odečtena hodnota pevnosti. Po odečtení hodnoty se příslušným tlačítkem stupnice vynulovala. Pro vzorek dané bentonitové směsi se naměřila hodnota pevnosti v tlaku  $\sigma_{tl} = 171 \text{ kPa}$ .

Pro měření **pevnosti ve stříhu** se musely vyměnit tlakové čelisti za čelisti pro stříh, které jsou půlkruhové a působí jen na protilehlé poloviny ploch základěn zkušebního válečku. Nastavila se stupnice určená pro stříhové namáhání (stupnice  $R_{tl}$ ) a čelisti se umístily do příslušné osy. Dále se měření provádělo stejným způsobem jako při měření pevnosti v tlaku. Hodnota pevnosti ve stříhu se pro daný vzorek bentonitové směsi naměřila  $\sigma_{střih} = 37 \text{ kPa}$ .



Obr. 3-4 Porušený zkušební váleček po zkoušce střihem

Pro **pevnost v tahu** se vytvářely zkušební vzorky ve tvaru "osmičky" viz obr. 3-5 Směs se navázila a zhomogenizovala jako při přípravě vzorků pro pevnost v tahu a ve střihu, opatrně se přesypala do formy s daným tvarem a opět se třemi rázy beranu spěchovala. Vzorek se zařízl do požadované výšky a vyndal se z formy.



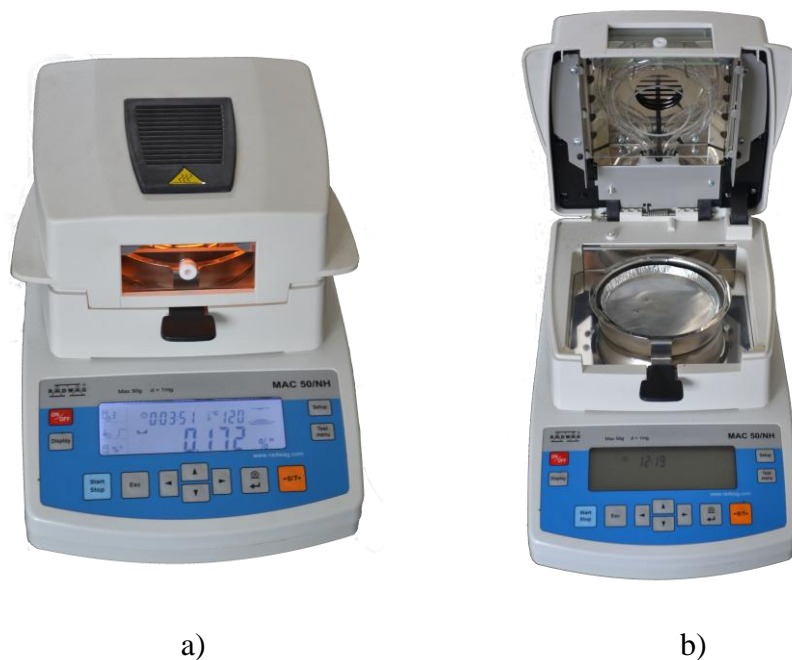
Obr. 3-5 Zkušební vzorek pro zkoušku tahem

Na přístroji se nastavila tahová stupnice  $R_{rl}$  a vzorek se umístil do tahových čelistí a ty se příslušným tlačítkem přístroje uvedly do pohybu. V okamžiku, kdy se vzorek přetrhl, přestala působit tahová síla a na stupnici přístroje byla odečtena hodnota pevnosti. Pro vzorek dané bentonitové směsi se naměřila hodnota pevnosti v tahu  $\sigma_{tah} = 34,5 \text{ kPa}$ .



### 3.2. Stanovení vlhkosti formovacích směsí

Ke stanovení vlhkosti formovacích směsí se zvolila metoda intenzivního sušení. Sušení vzorku se provádělo na programovatelném elektrickém analyzátoru vlhkosti MAC 50/NH (obr.3-6) s regulovatelnou teplotou a přesnou váhou.



a) analyzátor vlhkosti při sušení

b) otevřený analyzátor vlhkosti

Obr. 3-6 Analyzátor vlhkosti MAC 50/NH firmy RADWAG

**Analyzátor vlhkosti MAC 50/NH** je zařízení pro zjišťování relativní vlhkosti a určení suché hmotnosti malých vzorků různých materiálů. Tyto funkce umožňují rychle a přesně stanovit, kolik vody zkoumaný vzorek obsahuje. K dispozici je LCD nebo grafický displej, který umožňuje velmi jednoduché a intuitivní ovládání. Zařízení pracuje tak, že nejdříve určí hmotnost objektu položeného na vážení misce. Poté je vzorek rychle zahřán halogenovou nebo IR lampou, to způsobí uvolnění vlhkosti z testovaného vzorku. Během sušení zařízení průběžně kontroluje pokles hmotnosti a po následném výpočtu zobrazí aktuální hmotnost (vlhkost) na displeji. V analyzátoru vlhkosti je umožněno nastavit množství parametrů, které následně ovlivní celý průběh měření, např.: teplota, čas, sušící

profil. Ve srovnání s tradičními metodami určování vlhkosti je použití analyzátoru vlhkosti série MAC výrazně zkrácen měřicí čas a zjednodušen proces testování. [1]

### Průběh zkoušky

Nejprve se zapnul přístroj a provedla se kalibrace, kvůli přesnosti měření. Poté se pomocí ovládacích tlačítek vstoupilo do nastavení vlastního měření, kde se nastavil způsob ukončení sušícího procesu. V tomto případě se zvolilo ukončení procesu sušení jakmile se dosáhne ustálené hmotnosti (při sušení již nedochází k dalšímu poklesu hmotnosti). Dále se nastavila maximální teplota sušení (105°C) a způsob zahřívání (klasický skokový režim). Nakonec se zvolila hodnota výstupu a to přímo na hodnotu vlhkosti (změna hmotnosti, zaznamenána během sušícího procesu, v procentech). Tímto krokem se ukončilo základní nastavení a přešlo se k samotnému měření. Po zmáčknutí tlačítka start se postupovalo dle úkonů zobrazených na displeji. Nejprve se vložila jednorázová miska a zkalibrovala se váha, poté se na misku nasypalo dostatečné množství zkoušeného vzorku a zavřelo se víko přístroje. Tím se automaticky spustil přednastavený program sušení. Po ukončení procesu sušení zazněl zvukový signál a na displeji byla zobrazena hodnota vlhkosti daného vzorku. Pro vzorek dané bentonitové směsi se naměřila výsledná hodnota vlhkosti  $w_p = 3,117\%$ .

### 3.3. Stanovení prodyšnosti formovacích směsí

Pro stanovení prodyšnosti formovacích směsí byl použit přístroj LPiLR1 (obr. 3-7) polské výroby.

**Přístroj LPiLR1** pro stanovení prodyšnosti umožňuje protlačení 2000 cm<sup>3</sup> vzduchu zkušebním válečkem při použití trysky (dýzy) světlosti 0,5 mm za 270 s a při použití trysky (dýzy) světlosti 1,5 mm za 30 s. Zároveň se dosahuje přetlaková výška vzduchu 1,33 kPa při uzavřeném otvoru. Tlak vzduchu se vyvíjí ventilátorem a přivádí se pod zkušební váleček. Pokles tlaku se měří prstencovým manometrem, který se vychyluje kolem otočné osy. Otáčivý moment se přenáší pákou na běžec (ručičku), kterým je možno číst hodnotu přímo na stupnici. Výsledkem měření (hodnotou prodyšnosti) na tomto přístroji je tedy přímo čtená hodnota, popř. tlak ke kterému se v tabulce ČSN 72 1077 nalezne odpovídající hodnota prodyšnosti.



Obr. 3-7 Přístroj LPiLR1 pro stanovení prodyšnosti (polská výroba)

### Příprava vzorků a průběh zkoušky

Zkouška se prováděla na zkušebních válečcích standardních rozměrů, průměr i výška  $50 \pm 0,3$  mm. Do ocelového pouzdra se nasypalo stanovené množství směsi (množství směsi určeno stejně jako při zkoušce pevnosti) a třemi údery beranidla pěchovacího přístroje se vytvořil váleček výšky 50 mm. Spěchovaný zkušební váleček se ponechal v pouzdře a to se vložilo na hlavici přístroje. Pomocí páčky na boku přístroje se pouzdro na hlavici s tryskou utěsnilo a daným tlačítkem se spustil přístroj. Po ustálení ručičky prstencového manometru byla odečtena daná hodnota prodyšnosti. Pro vzorek dané bentonitové směsi byla naměřena **prodyšnost 152,5 j.p. SI** ( $\cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{Pa.s}$ )

### 3.4. Stanovení množství vyplavitelných látek formovacích směsí

Pro stanovení množství vyplavitelných látek se použil přístroj LSz-2 Multi-serw 2011 z Polska. Dále byla potřeba kalibrovaná skleněná kádinka s násoskou, jednoprocentní roztok hydroxidu sodného (NaOH), technické váhy, teploměr a přístroj na sušení směsí Analyzátor vlhkosti MAC 50/NH (popsaný v kapitole 3. 2. stanovení vlhkosti formovacích směsí).



Obr. 3-8 Přístroj LSz-2 Multi-serw 2011 k měření množství vyplavitelných látek s kádinkou, ve které je vzorek připravený k míchání

Navážilo se  $50 \pm 0,05$  g vzorku vysušeného v sušící peci při teplotě  $110 \pm 5$  °C a ochlazeného na teplotu místnosti. Navážka se nasypala do kádinky vysokého tvaru, zalila se 250 ml pitné vody a přidalo se 10 ml jednoprocentního roztoku hydroxidu sodného. Obsah kádinky se přivedl do varu a vařil se 3-4 minuty. Po ochlazení na teplotu místnosti se kádinka vložila na gumovou podložku pod vrtulové míchadlo, které se spustilo do nádoby a přístroj se zapnul. Míchání probíhalo 10 minut, po vypnutí se hlavice zvedla do horní polohy a z míchadla se pomocí stříčky opláchly částičky písku zpět do kádinky. Nádobka se vyjmula z přístroje a doplnila silným proudem vody do výšky 137,4 mm (dle tabulky 2.2) ode dna. Po 10 minutách stání se násoskou odsála suspenze a to až do poklesu hladiny na výšku 25 mm ode dna (výška sacího otvoru ode dna). Ke zbytku v kádince se znovu přidalo 10 ml jednoprocentního roztoku hydroxidu sodného a kádinka se opět doplnila silným proudem vody. Po 10 minutách stání se suspenze znovu stáhla násoskou. Další doplňování vody a stahování násoskou se opakovalo, jen s tím rozdílem, že už se nepřidával roztok hydroxidu sodného a doba usazování byla 5 minut. Tento postup se opakoval, dokud voda nad ostřivem nebyla čirá (viz obr. 3-9) . Poté se odsálo co

nejvíce vody a ostrivo usazené v kádince se přefiltrovalo a vysušilo při teplotě  $110 \pm 5$  °C. Vysušený vzorek se zvážil s přesností  $\pm 0,01$  g a uschoval k dalším zkouškám.



a)

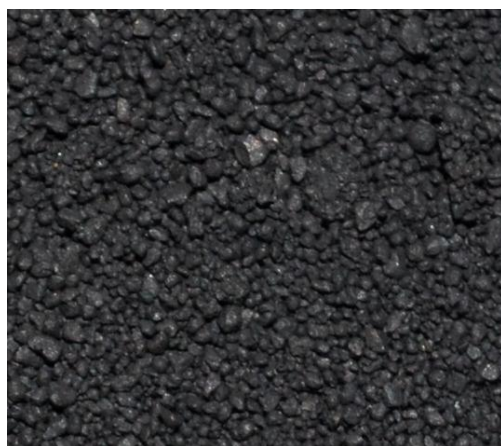
b)

*a) kádinka s násoskou před prvním odsátím suspenze*

*b) kádinka s násoskou na konci zkoušky (čirá voda nad usazeným ostrivem)*

Obr. 3-9 Kádinka s násoskou

Množství vyplavitelných látek se vypočítalo ze vzorce pro výpočet vyplavitelných látek. U daného vzorku bentonitové směsi bylo naměřeno množství **vyplavitelných látek 13,76 %**.



a)



b)

*a) vzorek směsi před zkouškou vyplavitelných látek*

*b) vzorek směsi po zkoušce vyplavitelných látek*

Obr. 3-10 Snímky bentonitové směsi

## 4. ZÁVĚR

Tato bakalářská práce byla zaměřena na sledování mechanických a technologických vlastností jednotné bentonitové formovací směsi, ze které jsou vyráběny pískové slévárenské formy pro výrobu litinových odlitků. Formovací směs je používána ve firmě MOTOR JIKOV slévárna litiny, a.s. České Budějovice.

Práce je rozdělena do dvou hlavních částí (teoretická a experimentální).

V teoretické části práce jsou popsány jak formovací směsi jako celek, tak jednotlivé složky formovacích směsí. Hlavním zaměřením této části práce je však popis jednotlivých vlastností formovacích směsí (jak mechanických, tak technologických) a metod jejich zkoušení.

Experimentální část práce (hlavní část), byla zaměřena na sledování vybraných vlastností formovacích směsí. Zkoušky jsou zde podrobně popsány a byly provedeny na vzorku jednotné bentonitové směsi, která je tvořená ostřivem Střeleč a pojivem byl směsný bentonit (KERIBENT C30 a SABENIL K). U každé zkoušky byl vzorek šestkrát proměřen. Z těchto naměřených hodnot byly vypočítány pro jednotlivé zkoušky průměrné hodnoty (příloha č. 1). Na základě zjištěných výsledků je možno formulovat tyto dílčí závěry:

1. Průměrná hodnota pevnosti v tlaku za syrova sledované formovací směsi je 171 kPa;
2. Průměrná hodnota pevnosti ve střihu je 37 kPa;
3. Průměrná hodnota pevnosti v tahu je 34,5 kPa;
4. Průměrná hodnota vlhkosti je 3,1 %;
5. Průměrná hodnota prodyšnosti je 153 j.p. SI;
6. Průměrná hodnota vyplavitelných látek činí 13,8 %.

Výsledky jednotlivých zkoušek byly potvrzeny dodavatelem směsi. Hodnoty pevnosti (v tlaku, ve střihu, v tahu), prodyšnosti i množství vyplavitelných látek byly shodné. Rozdíl ve výsledcích nastal u měření vlhkosti, kde firma měla hodnoty o něco vyšší. K těmto rozdílům mohlo dojít v důsledku skladování formovací směsi v temperované místnosti, což mohlo způsobit částečné vysušení. Dále byly výsledky

porovnány s různými bentonitovými směsmi, jejichž hodnoty byly měřeny v dnes již nefunkční Slévárně Liberec a.s. Hodnoty se nejvíce shodovaly s bentonitovou směsí popsanou v příloze č. 2.



## Seznam použité literatury

- [1] KAISR, J.: Sledování základních vlastností slévárenských ostřiv, Bakalářská práce, TU v Liberci 2012.
- [2] RUSÍN, K.: Disperzní formovací materiály, Praha, 1981.
- [3] FORMSERVIS, s.r.o. Hodnocení bentonitu a bentonitových směsí. Dokumentace kurzu pro pracovníky pískových laboratoří, Brno.
- [4] NOVÁ, I.; NOVÁKOVÁ, I.; BRADÁČ, J.: Technologie I. Slévání a svařování, Liberec, 2006.
- [5] STABRYŁA, J.: Technologia metali i tworzyw sztucznych, Cz.1 Technologia odlewnictwa, Olsztyn, 2002.
- [6] STRAKOŠOVÁ, P.: Interakce ostřivo - pojivo u fenolického uretanového systému (PUR COLD BOX), Ostrava, 2006.
- [7] NOVÁ, I.: Slévárenské formy (Vybraní statě přednášek). [Interní výuková pomůcka]. Liberec, 1997.
- [8] RUSÍN, K.: Formovací hmoty. [Skripta]. Praha, 1972.
- [9] JABŮREK, M.: Metody a zařízení pro zkoušení slévárenských formovacích látek, Brno, 1978.
- [10] HRUBOŇ, J. Výroba odlitků metodou odstředivého lití [online]. Zlín, 2011 [cit. 2013-03-29]. Dostupné z: [http://dspace.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/14807/hrubo%C5%88\\_2011\\_bp.pdf?sequence=1](http://dspace.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/14807/hrubo%C5%88_2011_bp.pdf?sequence=1). Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně.
- [11] <http://www.primat.cz/vfu-fvl/predmety/technologie-tvareni-slevani-a-svarovani-q3971/slevani-m6992/nelzestahnout/#primat> [online]. [cit. 2013-01-15].
- [12] <http://www.multiserw-morek.pl> [online]. [cit. 2013-04-23].





## Seznam obrázků

|   |    |
|---|----|
| Obr. 2-1 Schéma formovací směsi .....   | 9  |
| Obr. 2-2 Schematické znázornění principu zkoušek pevnostních vlastností<br>formovacích směsí [5].....                                       | 16 |
| Obr. 2-3 Přístroj k měření pevnosti [12] .....  | 17 |
| Obr. 2-4 Univerzální přístroj LRu s označením os [5] .....  | 18 |
| Obr. 2-5 Stanovení optimální vlhkosti bentonitové směsi z její prodyšnosti [7].....   | 24 |
| Obr. 2-6 Přístroj k měření množství vyplavitelných látek .....  | 25 |
| Obr. 2-7 Prosévací stroj se sítí .....  | 27 |
| Obr. 2-8 Konstrukce součtové křivky zrnitosti ostřiva [1] .....   | 28 |
| Obr. 3-1 Univerzální přístroj k měření pevnosti LRu (polská výroba).....  | 30 |
| Obr. 3-2 Zkušební válečky .....   | 31 |
| Obr. 3-3 Přístroj pro přechování zkušebních těles .....   | 31 |
| Obr. 3-4 Porušený zkušební váleček po zkoušce stříhem .....   | 32 |
| Obr. 3-5 Zkušební vzorek pro zkoušku tahem .....  | 32 |
| Obr. 3-6 Analyzátor vlhkosti MAC 50/NH firmy RADWAG.....  | 33 |
| Obr. 3-7 Přístroj LPiLR1 pro stanovení prodyšnosti (polská výroba).....   | 35 |
| Obr. 3-8 Přístroj LSz-2 Multi-serw 2011 k měření množství vyplavitelných látek s<br>kádinkou, ve které je vzorek připravený k míchání ..... | 36 |
| Obr. 3-9 Kádinka s násoskou .....   | 37 |
| Obr. 3-10 Snímky bentonitové směsi.....   | 37 |



## Seznam tabulek

|  |    |
|--|----|
| Tab. 2. 1 Rozsahy stupnic u univerzálního přístroje LRu [5] .....  | 18 |
| Tab. 2. 2 Výška hladiny vody v závislosti na její teplotě [3]..... | 26 |





## Seznam příloh

|  |   |
|--|---|
| Příloha č. 1 Tabulky naměřených hodnot .....           | 7 |
| Příloha č. 2 Jednotná bentonitová formovací směs ..... | 8 |



## **PŘÍLOHY**

## Příloha č. 1 Tabulky naměřených hodnot

### Pevnost v tlaku

| Měření číslo  | Naměřené hodnoty [kPa] |
|---------------|------------------------|
| 1             | 160                    |
| 2             | 173                    |
| 3             | 172                    |
| 4             | 179                    |
| 5             | 165                    |
| 6             | 178                    |
| <b>Průměr</b> | <b>171</b>             |

### Pevnost ve střihu

| Měření číslo  | Naměřené hodnoty [kPa] |
|---------------|------------------------|
| 1             | 39,50                  |
| 2             | 34                     |
| 3             | 37,50                  |
| 4             | 39                     |
| 5             | 38                     |
| 6             | 34                     |
| <b>Průměr</b> | <b>37</b>              |

### Pevnost v tahu

| Měření číslo  | Naměřené hodnoty [kPa] |
|---------------|------------------------|
| 1             | 40                     |
| 2             | 25                     |
| 3             | 42                     |
| 4             | 40                     |
| 5             | 35                     |
| 6             | 25                     |
| <b>Průměr</b> | <b>34,5</b>            |

### Vlhkost

| Měření číslo  | Naměřené hodnoty [hmot.%] |
|---------------|---------------------------|
| 1             | 3,037                     |
| 2             | 3,141                     |
| 3             | 3,122                     |
| 4             | 3,129                     |
| 5             | 3,117                     |
| 6             | 3,153                     |
| <b>Průměr</b> | <b>3,117</b>              |

### Prodyšnost

| Měření číslo  | Naměřené hodnoty. $10^{-8}$ [m <sup>2</sup> /Pa.s] |
|---------------|--|
| 1             | 156  |
| 2             | 153  |
| 3             | 150  |
| 4             | 155  |
| 5             | 151  |
| 6             | 150  |
| <b>Průměr</b> | <b>152,5</b>                                       |

### Vyplavitelné látky

| Měření číslo  | Naměřené hodnoty [hmot.%] |
|---------------|---------------------------|
| 1             | 13,92                     |
| 2             | 13,74                     |
| 3             | 14,3                      |
| 4             | 12,98                     |
| 5             | 14,06                     |
| 6             | 13,58                     |
| <b>Průměr</b> | <b>13,76</b>              |

## Příloha č. 2

### Jednotná bentonitová formovací směs určená pro výrobu na lince GZ a GF

**Složení:** Vratný písek  
Křemenný písek O-27  
Aktivovaný bentonit  
Kamenouhelná moučka  
Voda na předepsanou vlhkost

| <b>Technologické hodnoty směsi:</b> | přístroj       | hodnota         |
|-------------------------------------|----------------|-----------------|
| prodyšnost                          | GF-PRA,PED     | min. 210 j.p.SI |
| pevnost v tlaku za syrova           | GF-PRA,PFG     | 160-190 kPa     |
| vlhkost (orientačně)                | GF-PIT,PLW     | 3,5-4,5%        |
| spěchovatelnost                     | GF-PRA,pos.mě. | 35-44%          |
| obsah vyplavitelných látek          | GF-PWB,PLW     | 12,0-15,0%      |
| ztráta žíháním                      | anal.váhy, pec | 3,8-5,0%        |
| celkový uhlík                       | leco           | 2,5-3,3         |
| pH vodního výluhu(orientačně)       | lab.pH-metr    | 9,0-9,5         |
| obsah AB                            | titrace MM     | 9,0-12,0%       |

## **Prohlášení**

Byla jsem seznámena s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci, nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracovala samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím bakalářské práce.

Datum: 24. 5. 2013

Podpis: .....

## **Declaration**

I have been notified of fact that Copyright Act No. 121/2000 Coll. applies to my thesis in full, in particular Section 60, School Work.

I am fully aware that the Technical University of Liberec is not interfering in my copyright by using my thesis for the internal purposes of TUL.

If I use my thesis or grant a license for its use, I am aware of the fact that I must inform TUL of this fact; in this case TUL has the right to seek that I pay the expenses invested in the creation of my thesis to the full amount.

I compiled the thesis on my own with the use of the acknowledged sources and on the basis of consultation with the head of the thesis and a consultant.

Date: 24. 5. 2013

Signature: .....